

Analyse multi-échelle des grands délaminages en dynamique transitoire

Chloé Dupleix, Olivier Allix, Fabrice Gatuingt, Benoit Malherbe

▶ **To cite this version:**

Chloé Dupleix, Olivier Allix, Fabrice Gatuingt, Benoit Malherbe. Analyse multi-échelle des grands délaminages en dynamique transitoire. Congrès Français de Mécanique - CFM 2009, Aug 2009, Marseille, France. hal-01625043

HAL Id: hal-01625043
https://hal.science/hal-01625043

Submitted on 27 Oct 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse multi-échelle des grands délaminages en dynamique transitoire

C. DUPLEIX[a,b], O. ALLIX[a], F. GATUINGT[a], B. MALHERBE[b]

a. LMT, ENS Cachan, 61 avenue du Président Wilson, 94235 Cachan Cedex
b. Airbus France, 316 route de Narbonne, 31060 Toulouse Cedex 03

Résumé :

Les simulations actuelles de choc mou sur de grandes structures aéronautiques composite ne permettent pas de prédire précisément les zones délaminées. L'utilisation d'un modèle matériaux précis conduit à un nombre de ddl et des temps de calcul prohibitifs. Afin de rendre les temps de calcul acceptables tout en prédisant précisément le délaminage en dynamique, une méthode multiéchelle prenant en compte les différentes échelles spatiales et temporelles de dégradation est en cours de développement.

Abstract :

Actually, simulations of soft bodies impact on industrial aeronautic structures are not able to represent delamination area accurately. The use of refined material models for composite are too expensive in degrees of freedom and CPU time. In order to reduce CPU time, a multiscale analysis is developped to predict precisely the delamination in dynamic, taking into account the space and time scales.

Mots clefs : **dynamique, composite, calcul multi-échelle**

1 Problématique industrielle / Introduction

L'introduction des matériaux composites dans les structures aéronautiques fait apparaître de nouveaux enjeux dans le domaine des simulations numériques. Il est en effet nécessaire de pouvoir s'appuyer sur des simulations numériques fiables pour dimensionner ces structures. La connaissance précise de l'étendue des zones délaminées après un choc est notamment essentielle pour prédire la tenue résiduelle de la structure. Les calculs de choc actuellement réalisés utilisent des éléments de coques multicouches et des critères de rupture qui ne permettent pas de rendre compte du délaminage avec précision.

L'analyse du problème montre qu'il est multiéchelle en temps et en espace. En effet, les structures étudiées ici ont des dimensions de l'ordre du mètre et l'étendue des zones délaminées sont du même ordre de grandeur. Cependant, les phénomènes en jeu sont très locaux et ont lieu au niveau des plis élémentaires du stratifié : les ordres de grandeurs sont de l'ordre du dixième de millimètre. D'autre part, la durée des chocs étudiés est de quelques milli-secondes alors que les temps de dégradations au niveau des plis sont de l'ordre de la micro-seconde. La réalisation de simulations numériques précises nécessite la prise en compte de ces différentes échelles dans le calcul.

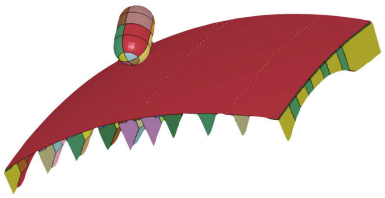


FIG. 1 – Structure industrielle

Le méso-modèle composite présenté dans [1] considère la structure composite stratifiée comme un empilement de plis homogènes et d'interfaces assurant le transfert des contraintes et déplacements entre les plis. L'utilisation d'une loi d'endommagement au sein de ces interfaces permet de simuler le délaminage.
L'application d'un tel modèle à une structure industrielle (c.f. figure 1) conduit cependant à un nombre de

degrés de liberté prohibitif. Une structure d'un mètre carré composée de 40 plis et maillée régulièrement conduit à un problème à 10 milliards de degrés de liberté. L'utilisation d'une telle modélisation pour le composite nécessite donc le développement d'une méthode de calcul permettant de réduire le temps de calcul.

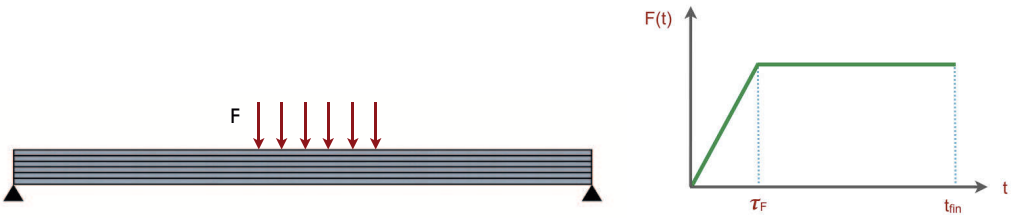
Le méso-modèle n'est pas utile en chaque point de la structure et à chaque instant de la simulation : la zone en cours de dégradation, ou *process zone*, est en effet du même ordre de grandeur que le pli élémentaire de composite. C'est la bonne description de cette *process zone* qui va permettre de modéliser correctement la propagation du délaminage dans la structure. En tout autre point, une modélisation plus grossière, ou macro, décrivant la cinématique et l'état de contrainte dans la structure, est suffisante. Au vu des dimensions de la structure, une modélisation type coque semble bien adaptée au problème.

Ainsi, une méthode multi-échelle en temps et en espace est à l'étude, utilisant le méso-modèle dans des zones localisées dans le but de réduire la taille des modèles et le temps de calcul. Les méthodes de décomposition de domaine en dynamique [2] constituent un premier point d'entrée. Dans un premier temps, un cas test est défini afin de tester ces méthodes dans le cadre de la mécanique de l'endommagement des interfaces.

2 Etude de l'échelle micro

2.1 Définition d'un cas test

Le cas industriel est ramené à un cas d'école 2D. Comme présenté dans la figure 2, on considère une plaque de longueur L en appui aux extrémités. La plaque considérée est constituée de deux plis de composites élastiques et d'une interface endommageable. Le choc est modélisé par un échelon d'effort appliqué au centre de la plaque.



(a) (b)

FIG. 2 – Cas test : (a) structure étudiée et (b) effort appliqué

L'étude se place dans un cadre dynamique. On note $\mathbf{M}$ la matrice masse du problème, $\mathbf{K}$ sa matrice raideur, F le vecteur des efforts extérieurs sur la structure étudiée. L'équation que l'on cherche à résoudre s'écrit alors :

$$\mathbf{M}\ddot{U} + \mathbf{K}U = F \tag{1}$$

Pour résoudre ce problème, un schéma de Newmark est utilisé :

$$\begin{cases} U_{n+1} = \underbrace{U_n + \Delta t \dot{U}_n + (\frac{1}{2} - \beta)\Delta t^2 \ddot{U}_n}_{U^p} + \beta \Delta t^2 \ddot{U}_{n+1} \\ \dot{U}_{n+1} = \underbrace{\dot{U}_n + \Delta t(1-\gamma)\ddot{U}_n}_{\dot{U}^p} + \gamma \Delta t \ddot{U}_{n+1} \end{cases} \tag{2}$$

En introduisant la discrétisation en temps dans l'équation 1, on obtient alors l'équation suivante à résoudre à chaque pas de temps du calcul :

$$\underbrace{(\mathbf{M} + \beta \Delta t^2 \mathbf{K})}_{\widetilde{\mathbf{M}}} \ddot{U}_{n+1} = F_{ext} - \mathbf{K}U^p \tag{3}$$

On se place dans le cas d'un schéma de Newmark explicite ($\beta = 0$ et $\gamma = 1/2$), la matrice masse M du problème est diagonalisée.

Le délaminage est représenté grâce à l'introduction d'éléments d'interface avec un comportement élastique endommageable [3]. L'endommagement des interfaces évolue selon une loi à effet retard [4], entraînant la diminution des traction transmises entre les plis en fonction de l'ouverture et des glissements entre les plis. Un

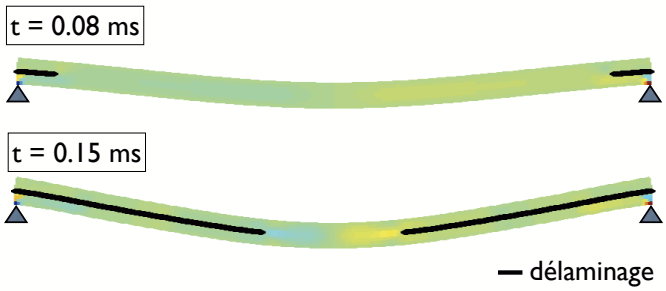


FIG. 3 – Etendue du délaminage à deux instants du calcul

endommagement égal à 1 correspond à la séparation complète des plis du composite. La loi de comportement de l'interface peut s'écrire :

$$\begin{cases} \sigma_N = k_n^+(1-d) < [U_n] >_+ + k_n^- < [U_n] >_- \\ \sigma_T = k_t(1-d)[U_t] \end{cases} \tag{4}$$

où
– d est la variable d'endommagement de l'interface,
– k_n^+,k_n^- , k_t sont les pseudo raideurs des interfaces en traction, compression et cisaillement,
– $[U_n]$, $[U_t]$ sont les sauts de déplacement normaux et tangentiels au plan de l'interface.

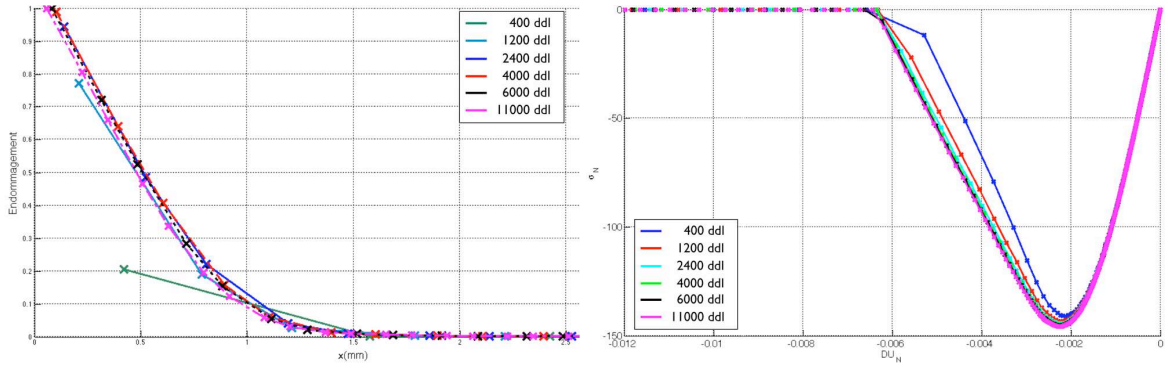
La présence des interfaces dans la structure intervient par l'ajout d'un effort dans l'équation d'équilibre dynamique 1 :

$$F_{int} = \int_{S_i} B^T \sigma dS \tag{5}$$

2.2 Le méso-modèle dans un cadre dynamique

Dans l'exemple traité ici, les paramètres matériaux de l'interface et de la loi d'endommagement sont choisis de telle sorte que le délaminage s'initie au niveau des appuis de la plaque puis se propage vers le centre de la plaque. La figure 3 présente la zone délaminée à 2 instants du calcul.

Afin de définir la taille de maille permettant de représenter correctement la propagation du délaminage, une étude de raffinement de maillage est menée sur le cas test. Les maillages des plis sont réguliers et composés d'éléments quadrilatères linéaires. Pour chaque maillage, on observe l'évolution de l'endommagement le long de l'interface à l'instant d'initiation de la fissure (figure 4(a)) et la description de la loi de comportement normale définie dans l'équation 4 (figure 4(b)).



(a) (b)

FIG. 4 – Etude de raffinement de maillage : (a) comparaison de l'évolution de l'endommagement au point A et (b) courbe de comportement au point B (c.f. figure 5)

Au niveau de la description spatiale, les calculs convergent à partir d'une description de la *process zone* par 6 éléments (c.f. figure 4(a)). D'autre part, les pas de temps correspondant ($\approx 10^{-5}$ms) permettent pour ces

maillages une bonne description de la loi de comportement de l'interface (c.f. figure 4(b)).

Cette première étude confirme les premières estimations du nombre de degrés de liberté nécessaire au calcul d'une structure industrielle. L'application immédiate du méso-modèle à ces grandes structures est impossible.

3 Une méthode de décomposition de domaine en dynamique

3.1 Principe de la méthode

La méthode de décomposition de domaine en dynamique décrite dans [2] est une méthode de calcul multiéchelle. Elle permet de coupler des maillages et des schémas de résolution numérique différents selon les sous-domaines.

Dans un premier temps, la structure étudiée est décomposée en sous-domaine et maillée selon les phénomènes en cours dans la structure. Pour s sous domaines, les équations à résoudre sont :

$$\begin{cases} \forall k \in [1,s] \ \widetilde{\mathbf{M}}^k \ddot{U}^k_{n+1} = F^k_{ext} - \mathbf{K}^{kp} U^k + F^k_{link} \\ \sum_{k=1}^{s} C^k_{n+1} \dot{U}^k_{n+1} = 0 \end{cases} \tag{6}$$

où F^k_{link} représente les efforts au niveau des frontières entre chaque sous domaine. Ces efforts sont définis en imposant la continuité des efforts aux frontières entre sous-domaines représentée par la seconde équation.

Pour la résolution, le problème est séparé en deux (c.f. [2]) :
– Un problème d'équilibre local aux sous domaines qui consiste à résoudre séparément dans chaque sous-domaine l'équation d'équilibre dynamique,
– Un problème d'équilibre global sur l'ensemble des frontières entre sous domaines résultant de la continuité des vitesses sur les frontières entre sous domaines.
La solution du problème global initial est la somme des solutions des deux problèmes découplés.

Dans le cas de maillages incompatibles, deux problèmes apparaissent.
Tout d'abord, l'utilisation de maillage de tailles différentes dans chaque sous domaine implique qu'au niveau des frontières, les nœuds de maillages adjacents ne sont pas forcément coïncidant. On choisit alors de discrétiser les nœuds de la frontière sur le maillage le plus fin (c.f. [5]). Les vitesses manquantes du maillage le plus grossier sont alors interpolées linéairement.
D'autre part, des tailles de maille différentes nécessitent l'utilisation de pas de temps différents dans les sous domaines en dynamique explicite. On utilise ici, de même que dans [6], des pas de temps proportionnels. Le problème global est résolu à chaque pas de temps le plus fin. Les vitesses des sous domaines avec des pas de temps plus importants, nécessaires à la résolution du problème global, sont estimées par interpolation linéaire des vitesses obtenues aux pas de temps les plus proches.

3.2 Application au cas test

Cette méthode de décomposition de domaine est appliquée sur le cas test présenté en 2.1. La figure 5 présente les maillages utilisés.

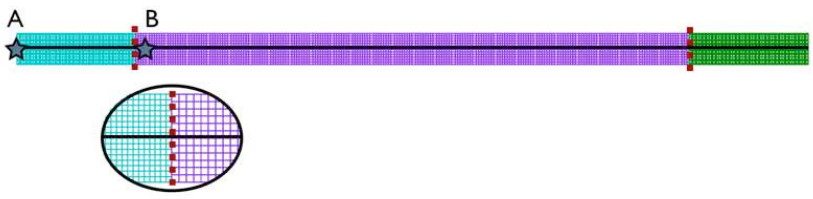
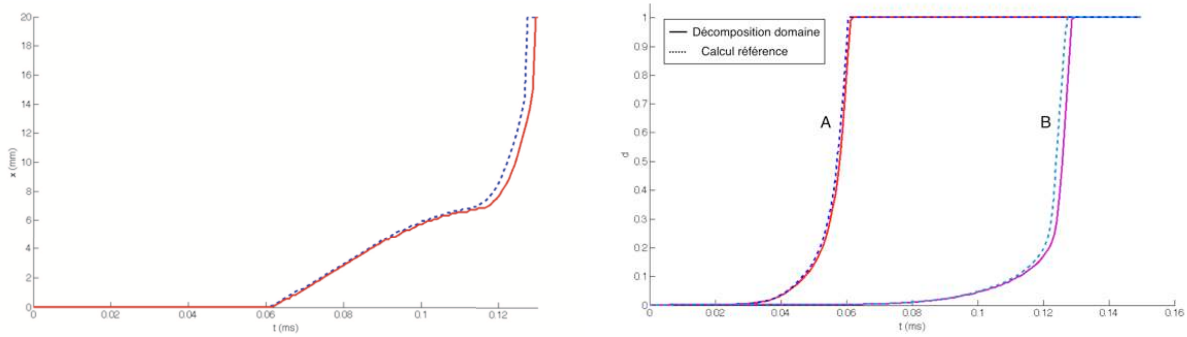


FIG. 5 – Maillage du problème

Le maillage est réalisé d'après les résultats de la partie 2.2 : la structure est décomposée en trois sous domaines : les deux sous domaines aux extrémités de la plaque sont maillés finement, le sous domaine central est maillé plus grossièrement. Cependant, afin d'assurer une bonne représentation de la cinématique et de la propagation du délaminage dans le domaine central, le maillage utilisé reste relativement fin. Le pas de temps du domaine central est deux fois plus grand que celui des deux domaines aux extrémités de la plaque.



(a) (b)

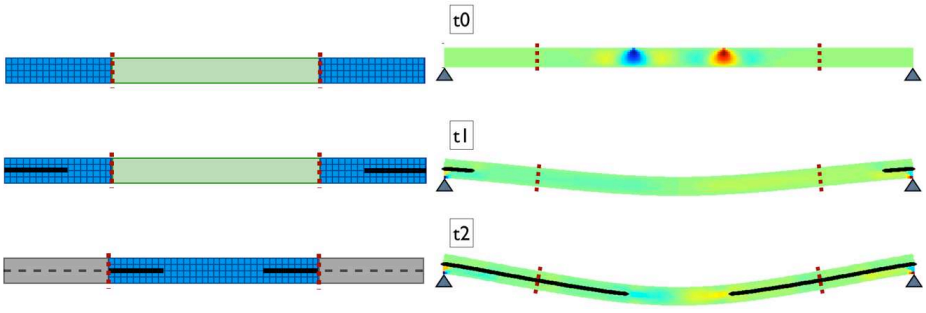
FIG. 6 – Comparaison avec le calcul de référence : (a) avancée du délaminage dans l'interface au cours du temps et (b) évolution de l'endommagement au cours du temps aux points A et B (c.f. figure 5)

La figure 6 compare les résultats obtenus pour le calcul de référence et pour le calcul par décomposition de domaine. D'une part, la figure 6(a) présente l'avancée de la fissure débutant au point A et se propageant vers le centre de la plaque pour les deux calculs. Les deux résultats sont similaires : les vitesses de propagation de la fissure sont identiques. On notera un léger décalage dû à la discrétisation plus grossière du sous-domaine central. D'autre part, l'évolution de l'endommagement au point d'initiation de la fissure (A) et au niveau de la frontière entre les sous-domaines (B) est similaire dans les deux calculs.

4 Conclusions et perspectives

Les premiers développement d'une méthode de calcul multi-échelle de choc sur des structures composites ont été présentés. Les résultats montrent que l'application d'une méthode de décomposition de domaines en dynamique en combinaison avec le méso-modèle donne des résultats satisfaisants : le délaminage se propage entre sous-domaines.

La suite de l'étude consistera à définir une échelle macro permettant de n'activer le méso-modèle que dans les zones où son utilisation est indispensable.
En vue de coupler efficacement l'échelle méso et l'échelle macro, on s'oriente vers une description de type coque 3D dans les zones non endommagées de la structure. Dans la littérature, de nombreux éléments de coque 3D ont été développés. On pourra se référer à [7] pour une liste des éléments coques développés ces dernières années. On s'attachera à utiliser un élément permettant de décrire correctement la cinématique et l'état de contrainte dans la structure. Plusieurs éléments, basés soit sur une modification de la matrice raideur d'éléments 3D linéaires classique (voir par exemple [8], [9]), soit sur une modification de la théorie des plaques (voir par exemple [10], [11]) sont notamment présents dans la littérature.



(a) (b)

FIG. 7 – Evolution de la modélisation (a) en fonction de la propagation du délaminage (b)

La figure 7 présente la procédure envisagée par la suite pour le calcul : en début de calcul, le méso-modèle est utilisé dans les zones où le délaminage est susceptible de débuter, ici aux appuis. Ailleurs dans la structure, une description macro, type coque, est utilisée.
Quand le délaminage se propage, il est nécessaire de faire évoluer la modélisation : au centre de la plaque, le méso-modèle doit être utilisé. Cependant, les sous-domaines des extrémités sont totalement délaminés, le méso-modèle n'est plus nécessaire et une modélisation macro prenant en compte la fissure peut être utilisée.

Des méthodes telles que la X-FEM ou la E-FEM sont envisagées.

Références

[1] Ladevèze P. A damage computational approach for composites : Basic aspects and michromechanical relations. Computational Mechanics, 17, 142–150, 1995.

[2] Gravouil A. and Combescure A. Multi time step explicit-implicit method for non-linear structural dynamics. International Journal For Numerical Methods In Engineering, 50, 199–225, 2001.

[3] Allix O., Ladevèze P., and A.Corigliano . Damage analysis of interlaminar fracture specimens. Composite Structures, 31, 61–74, 1995.

[4] Ladevèze P., Allix O., Deü J.-F., and Lévêque D. A mesomodel for localisation and damage computation in laminates. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 183, 105–122, 2000.

[5] Herry B., Valentin L. D., and Combescure A. An approach to the connection between subdomains with non-matching meshes for transient mechanical analysis. International Journal For Numerical Methods In Engineering, 55, 973–1003, 2002.

[6] Faucher V. and Combescure A. A time and space mortar method for coupling linear modal subdomains and non-linear subdomains in explicit structural dynamics. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 192, 509–533, 2003.

[7] Yang H., Saigal S., Masud A., and Kapania R. A survey of recent shell finite elements. International Journal For Numerical Methods In Engineering, 47, 101–127, 2000.

[8] Hauptmann R. and Schweirzerhof K. A systematic development of ”solid-shell” element formulations for linear and non-linear analyses employing only displacement degrees of freedom. International Journal For Numerical Methods In Engineering, 42, 49–69, 1998.

[9] Klinkel S., Gruttmann F., and Wagner W. A continuum based three-dimensional shell element for laminated structures. Computers and Structures, 71, 43–62, 1999.

[10] Parisch H. An continuum based shell theory for non-linear applications. International Journal For Numerical Methods In Engineering, 38, 1855–1883, 1995.

[11] Hashagen F., de Borst R., and de Vries T. Delamination behavior of spliced fiber metal laminates. part 2 : Numerical investigation. Composite Structures, 46, 147–162, 1999.